بررسی رفتار فشار شبه استاتیکی قوطی‌های پرشده با کامپوزیت فومی Al-Si-SiC-xFe *

محمدجواد نیری[۱]   محمدجواد خواجه‌علی[۲]   سید محمدحسین میرباقری[۳]

چکیده

اثر آهن بر ساختار سلولی و جذب انرژی لوله‌های جدار نازک برنجی، پر شده با فوم‌های Al-7Si-3SiC-xFe تولید شده به روش متالورژی پودر، در بارگذاری فشاری تک محوری بررسی شد. نتایج نشان داد که افزایش درصد وزنی آهن تا ۳ ٪ وزنی سبب همگن شدن نسبی ساختار سلولی، افزایش چگالی و گردی حفره‌ها می‌شود. در حالیکه به دلیل تشکیل فازهای بین فلزی سوزنی Al_4Fe_2Si در دیواره سلولی و همچنین تشکیل حفره های انقباضی در مناطق سه گوش گسترش یافته بین حباب ها، مقدار جذب انرژی طی تغییر کمانش پلاستیک پیشرونده کاهش می‌یابد. همچنین، با در نظر گرفتن داده‌های عددی، مدلی برای پیشبینی جذب انرژی لوله‌های پر شده با فوم‌های فلزی بر حسب هندسه فوم و لوله و چگالی نسبی فوم ارائه و صحه سنجی شده است.

واژه های کلیدی فوم سلول بسته آلومینیوم؛ متالورژی پودر؛ ساختار جدار نازک؛ جذب انرژی.

Quasi Static Compressive Behavior of Al-Si-SiC-xFe Foam Filled Crash Boxes

M. J. Nayyeri   M. J. Khajeh Ali   S. M. H. Mirbagheri

Abstract

The effect of iron on the structure and absorbed energy in thin-walled brass tubes filled with Al-Si-SiC-xFe foams, produced through powder metallurgy rout, during uniaxial compressive loading was evaluated. Results showed that by increasing the iron content up to 3 wt.% will increase the sphericity of the cells, foam density and homogeneity of the structure. However, the formation of Al_4Fe_2Si intermetallic and micro-shrinkage in the cell walls and edges resulted in a decrease in the magnitude of the absorbed energy. Moreover, according to experimental data, a model was developed based on the relative density of the foam along with the geometry of the foam and tube. This model was used to predict the energy absorption of foam filled tubes.

Key Words Closed Cell Aluminum Foam; Powder Metallurgy; Thin Walled Structure; Energy Absorption.

---

* نسخه‌ی نخست مقاله در تاریخ ۹۲/٦/۲۲ و نسخه‌ی پایانی آن در تاریخ ۹۳/۱۱/۲۵ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده مسئول: دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

(۳) دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

مقدمه

ستون‌های فلزی منشوری جدار نازک، اجزایی کارآمد با هزینه تمام شده پایین هستند که بطور گسترده در صنایع اتومبیل‌سازی به منظور بالا بردن میزان جذب انرژی در تصادفات استفاده می‌شوند. مطالعات زیادی چه بصورت عملی و چه بصورت عددی توسط محققین مختلف برای تعیین خصوصیات و ویژگی‌های جذب انرژی این لوله‌ها انجام گرفته است [1-5]. روش‌های جذب انرژی با استفاده از لوله‌های جدار نازک در فشار تک محوره شامل کمانش پلاستیک، پارگی محوری، تورفتگی جانبی و فشردگی جانبی است [6] که منحنی نیرو- جابجایی این سازه‌ها را مشابه یکدیگر و شامل سه منطقه مجزا می‌سازد: ناحیه الاستیک، ناحیه‌ای با نیروی موجی شکل (افت و خیز) که هر موج به دلیل تشکیل یک لولا است و ناحیه انتهایی موسوم به منطقه چگالش. این در حالی است که علاوه بر نرخ کرنش، پارامترهای هندسی (طول، سطح مقطع و ضخامت جداره) تاثیر زیادی بر الگوی کمانش پلاستیک دارند. در صورتی که طول تمامی قطعات یکسان فرض شود، الگوی کمانش آکاردئونی (متقارن) بیشترین جذب انرژی را نسبت به دو الگوی نامتقارن و الماسی دارد؛ این امر به علت تغییر شکل بیشتر جداره‌های لوله در تغییر شکل آکاردئونی است [6].

کل انرژی جذب شده در این فرآیند را به کمک معادله (۱) با محاسبه سطح زیر منحنی نیرو- جابجایی تا میزان کرنش موثر، می‌توان بدست آورد. همچنین، نیروی متوسط له شدن (F_{ave}) را می‌توان با تقسیم کل انرژی جذب شده بر میزان کرنش موثر مطابق معادله (۲) محاسبه کرد [2,7-9].

$$E_a = \int_0^{\delta_{eff}} F(x)\,dx \qquad (۱)$$

$$F_{ave} = \frac{\int_0^{\delta_{eff}} F(x)\,dx}{\delta_{eff}} \qquad (۲)$$

اگرچه ساختارهای جدار نازک از مزایایی همچون قابلیت جذب انرژی در بارهای محوری بهره‌مند هستند، اما تحت بارهای چند محوره به خوبی عمل نمی‌کنند [10-12]. از طرف دیگر، در حادثه ضربه، فوم‌های فلزی این قابلیت را دارند که در تمامی جهات بصورت پلاستیک در یک تنش نسبتاً ثابت در ناحیه بزرگی از کرنش در حالیکه در حال جذب انرژی هستند، تغییر شکل دهند. کارایی مکانیکی این فوم‌های فلزی به شدت تحت تاثیر ویژگی‌هایی چون اندازه و شکل حفره‌ها، ضخامت دیواره حفره‌ها و نحوه اتصال آنها است. لذا، برای بهبود جذب انرژی ساختار جدار نازک بدون افزایش حجم و وزن قابل ملاحظه، علاوه بر افزایش ضخامت جداره آنها، می‌توان از مواد پلیمری یا متخلخل از قبیل ساختارهای لانه زنبوری یا فوم‌های فلزی برای پر کردن فضای داخلی آنها استفاده نمود. تحقیقات نشان می‌دهد که در رابطه با لوله‌های پر شده با فوم پلیمری، ضخیم کردن جداره لوله‌ها از لحاظ اقتصادی و میزان جذب انرژی به صرفه‌تر است تا پر کردن آنها در حالیکه در مورد قوطی‌های پرشده با فوم آلومینیومی، صرفه با پر شدن با فوم فلزی است تا ضخیم کردن جداره لوله‌ها [13-16].

رفتار تغییر شکل لوله پر شده از فوم فلزی با لوله خالی متفاوت است. کمانش اولیه در مقاطع پر شده از فوم بر اساس حالتی مشابه الاستیک اتفاق می‌افتد که منجر به کاهش طول کمانش می‌شود. در نتیجه، تعداد لولاها در لوله تو پر در مقایسه با لوله توخالی به دلیل اندرکنش بین فوم و جداره لوله افزایش می‌یابد. همچنین، نتایج آنها نشان می‌دهد که تعداد لولاهای ایجاد شده با چگالی فوم افزایش پیدا می‌کند. همچنین نیروی لازم برای له شدن لوله نیز افزایش می‌یابد [17,18]. این افزایش را می‌توان بصورت معادله (۳) بیان کرد [8]:

$$F_{total} = F_{column} + F_{foam} + F_{Interaction} \qquad (۳)$$

که از چپ به راست به ترتیب نیروی متوسط برای له شدن لوله توپر، لوله تو خالی، فوم و اندرکنش بین فوم و دیواره است. محققین مشاهده نموده‌اند که وجود اندرکنش بین فوم و دیواره لوله، اندازه لولاها را کاهش می‌دهد. بنابراین، فوم داخل لوله روی تعداد

لولاهای بوجود آمده اثر می‌گذارد و تعداد کل این لولاها با چگالی فوم ارتباط مستقیم دارد. همچنین، محققین توانستند بر اساس نتایج تجربی، معادله (۵) را برای پیش‌بینی نیروی لازم به منظور له نمودن لوله‌های تو پر ارائه دهند [19]:

$$F_{total} = 13.06\sigma_0 c_m^{\frac{1}{3}} h^{\frac{5}{3}} + c_f^2\sigma_f + C_{avg} c_m h\sqrt{\sigma_f\sigma_0} \qquad (۵)$$

که در آن c و h به ترتیب نصف عرض و ضخامت قوطی است و $c_m = c\text{-}h$، $c_f = c\text{-}2h$ و C_{avg} ثابت معادله است و بصورت تجربی بدست می‌آید.

مطالعات زیادی برای درک اثر اضافه کردن عناصر بر رفتار فوم شوندگی، زه کشی، ساختار سلول‌ها و نیز خواص مکانیکی فوم‌ها انجام گرفته است [20-22]. مشابه روش‌های ذوبی، در روش متالورژی پودر نیز از ذرات سرامیکی به عنوان پایدار کننده فوم استفاده می‌شود [21,23,24]. مشخص شده است که ذرات کاربید سیلیسیم (SiC) در فوم آلومینیمی سبب افزایش استحکام فشاری فوم و کاهش زه کشی و نرخ رشد سلول‌ها می‌شود در حالیکه اضافه شدن آلومینا (Al_2O_3) باعث افزایش انبساط فوم می‌گردد. لازم به ذکر است که تاثیر مثبت اضافه کردن ذرات سرامیکی وابسته به ترکیب شیمیایی فلز زمینه است. برای مثال، زه کشی مذاب با افزایش ترشوندگی بین ذرات و مذاب آلومینیم افزایش می‌یابد. در کنار ذرات سرامیکی، از ترکیبات بین فلزی نیز می توان برای پایدار سازی فوم استفاده کرد. آهن که معمولترین و در عین حال در برخی از موارد ناخالصی مضر در آلیاژهای آلومینیم محسوب می‌شود، بدلیل حلالیت کم خود، به شکل ترکیبات بین فلزی ظاهر می‌شود [25,26]. از طرف دیگر، بدلیل تر شوندگی کم بین مذاب و ترکیبات بین فلزی سیستم Fe-Al-Si، می‌توان از این فازها برای پایدارسازی فوم استفاده کرد.

مروری بر مقالات و منابع منتشره نشان می‌دهد که تحقیقات زیادی در زمینه اثر آهن بر رفتار فوم شوندگی آلیاژهای آلومینیم صورت نگرفته است. به همین منظور هدف از پژوهش حاضر بررسی اثر آهن بر ساختار سلول‌ها و اندازه‌گیری میزان جذب انرژی آن طی کمانش پلاستیک قوطی‌های پرشده با فوم آلومینیم- سیلیسیم در فشار تک محوری است. همچنین اثر شکل و اندازه سطح مقطع‌های مختلف لوله‌های جداره نازک علاوه بر مورفولوژی ساختار سلولی فوم بر جذب انرژی نیز مورد مطالعه و مدل‌سازی نسبتاً ساده‌ای قرار گرفته است.

روش پژوهش

از پودر آلومینیم، سیلیسیم، کاربید سیلیسیم، هیدرید تیتانیم و آهن برای تولید فوم آلیاژی مورد نظر، مطابق جدول (۱)، استفاده شد. به منظور فهم تاثیر آهن بر رفتار فوم شوندگی و فشاری قوطی‌های پر شده از فوم، پودرها مطابق جدول (۲) توزین شدند. برای رسیدن به ترکیبی یکنواخت، پودرها در مخلوط کن فولادی به مدت ۱ ساعت مخلوط و همگن شدند. به منظور اطمینان از قرارگیری کامل عامل حباب زا در زمینه و بدست آوردن پیش ماده‌ای با چگالی تئوری نزدیک به ۹۹٪، از هر دو روش پرس ایزواستاتیک سرد و گرم در ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شد [27].

جدول ۱ مشخصات پودرهای مورد استفاده در تولید پیش ماده

ترکیب شیمیایی	خلوص (%)	اندازه (μm)
SiC	۹۵	۲۵>
TiH_2	۹۸	٤٤>
Si	۹۵	۱۵۰>
Fe	۹۹	٤٤>
Al	۹۷	٦۳>

جدول ۲ وزن پودرهای استفاده شده (درصد وزنی)

نمونه	TiH_2 (%)	Si (%)	SiC (%)	Fe (%)	Al
۱	۱	۷	۳	۰	مابقی
۲	۱	۷	۳	۱	مابقی
۳	۱	۷	۳	۳	مابقی

پرس سرد منجر به تولید استوانه پودری چگال با

قطر ٦٣ میلی‌متر می‌شود. سطوح تماس در حین پرس با استئارات روی روانکاری شد. همچنین برای رسیدن به ماده‌ای با قابلیت فوم شوندگی بالا، پس از پرس ایزواستاتیک سرد، از پرس گرم نیز برای حذف تخلخل‌ها با نسبت اکستروژن ١٥/٦ استفاده شد.

به منظور بررسی اثر سطح مقطع بر میزان جذب انرژی در فشار تک محوره شبه استاتیکی، سه لوله برنجی با ترکیب Cu-20%Zn به قطر ١٦، ٢٢ و ٣٥ میلی‌متر و سه قوطی با مقطع مربع و به ابعاد ١٤×١٤، ٢٠×٢٠ و ٣٠×٣٠ با ضخامت یکسان و برابر ١ میلی‌متر با نسبت ارتفاع به قطر ١/٥، انتخاب و تا ٧٠٠ درجه سانتی‌گراد پیش-گرم شدند. پیش فوم آماده شده، به تکه‌های مناسب بریده و پس از قرار دادن در داخل لوله برنجی، تا تشکیل فوم در این دما نگه داشته شد. سپس از کوره خارج و سریع در دمش هوا سرد شد. بارگذاری محوری نمونه‌ها با سرعت فک ٢٥ میلی‌متر بر دقیقه صورت گرفت. از نمودار تنش-کرنش لوله‌های تو خالی و پر از فوم فلزی بدست آمده از آزمون کشش برای محاسبه جذب انرژی استفاده شد. به منظور افزایش دقت آزمون و نیز بررسی تکرار پذیری آن، از هر نمونه سه عدد آماده شد و مورد آزمایش قرار گرفت. برای مشخص کردن نمونه‌ها هر کدام از آنها کدگذاری شد. به این روش که هر کد شامل دو قسمت عددی و حروف الفباء است. عدد نشان دهنده میزان درصد وزنی آهن و حروف به ترتیب نشان دهنده شکل هندسی مقطع (C برای دایره و S برای مربع) و اندازه قوطی (S برای کوچک، M برای متوسط و L برای بزرگ) می‌باشد. برای مثال 3SL نشان دهنده نمونه‌ای حاوی ٣٪ آهن با بزرگترین مقطع مربعی است.

از دو پارامتر ریزساختاری برای مقایسه ویژگی‌های ریزساختاری فوم‌ها استفاده شد. پارامتر اول گردی مطابق معادله (٦) [٢٨]:

$$\text{Roundness} = \frac{4\pi A}{P^2} \qquad (٦)$$

که A و P به ترتیب مساحت و محیط حفرات در سطح مقطع نمونه‌ها هستند. پارامتر گردی در محدوده ٠ تا ١ تغییر می‌کند و با افزایش مقدار آن تا ١، حفرات به سمت کره می‌روند. پارامتر دیگر ضریب فشردگی است که مطابق معادله (٧) تعریف می‌شود [٢٨]:

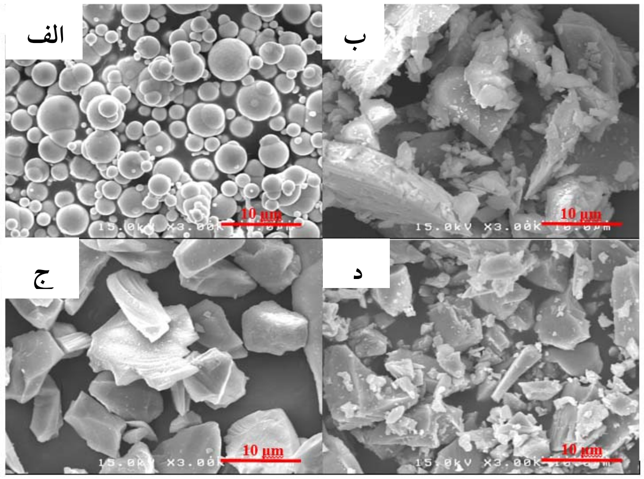
$$\text{Compactness} = \frac{\sqrt{\frac{4A}{\pi}}}{L} \qquad (٧)$$

که در آن L قطر بزرگ متوسط سلول است.

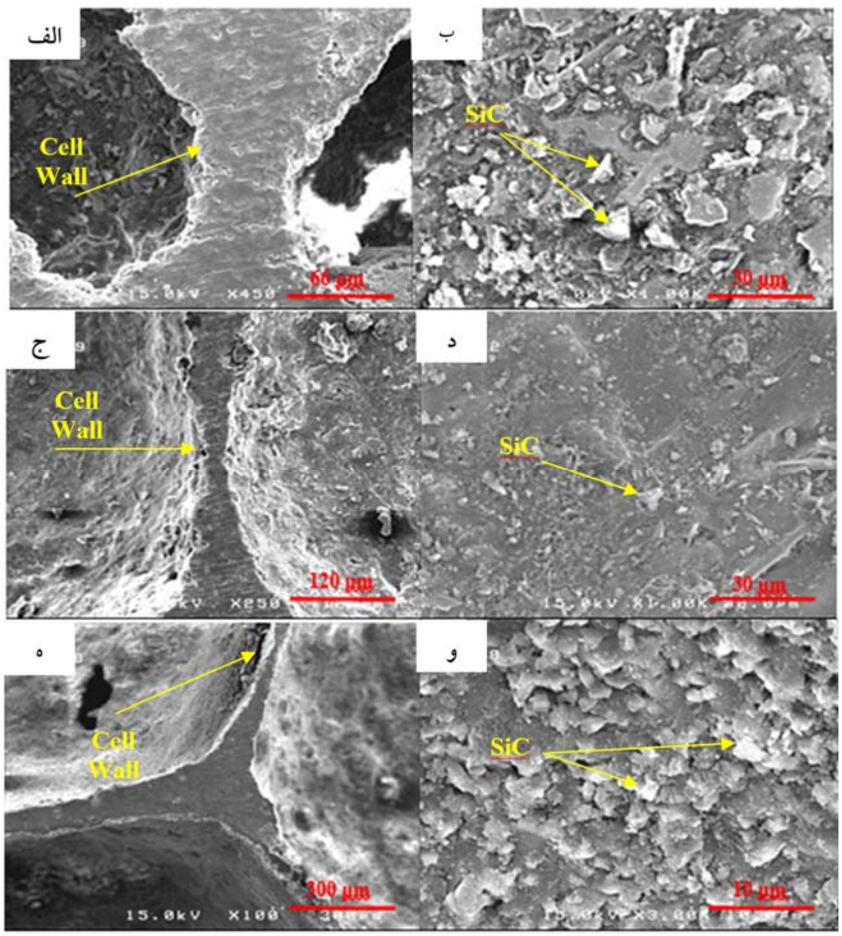
از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی به منظور بررسی‌های ریزساختاری استفاده شد. به این منظور نمونه‌ها پس از سنباده زنی و پولیش، با محلول نایتال ١ ٪ اچ شدند. برای بررسی کرویت، اندازه و پراکندگی حفرات نمونه‌ها از ١٠ نقطه مختلف نمونه برداری شد و میانگین نتایج گزارش شد.

بحث و تحلیل نتایج

شکل (١) تصاویر میکروسکوپ الکترونی از پودرهای مورد استفاده به منظور ارزیابی پراکندگی، شکل و تنوع اندازه ذرات پودری را نشان می‌دهد. پس از پرس سرد، چگالی پیش فوم تولیدی برای نمونه های حاوی ٠، ١ و ٣ ٪ آهن به ترتیب به ٢/٦٥، ٢/٦٨ و ٢/٦٣ گرم بر سانتی‌متر مکعب رسید. افزودن ذرات کاربید سیلیسیم سبب بزرگ شدن سلول‌های بی‌شکل و کاهش میزان زه‌کشی دیواره‌های سلولی می‌شود [23]. از طرف دیگر، عدم توزیع یکنواخت ذرات کاربید سیلیسیم منجر به ایجاد عیوب ساختاری و ترک خواهد شد. همانطور که در شکل (٢) دیده می‌شود، ذرات کاربید سیلیسیم در دیواره‌های سلولی قرار دارند. در صورتیکه ذرات تقویت کننده در فصل مشترک گاز- جامد حضور داشته باشند، در حین مرحله تشکیل حباب‌های فوم امکان انفجار و از هم پاشیدگی این حفره‌ها وجود دارد. لذا، می‌توان نتیجه گرفت که ذرات کاربید سیلیسیم به دلیل پخش یکنواخت در دیواره سلولی و نه فصل مشترک گاز- جامد، نقش پایدار کننده‌گی دارند.



شکل ۱ تصویر میکروسکوپ الکترونی پودرهای استفاده شده الف) پودر آهن، ب) سیلیسیم،
ج) کاربید سیلیسیم و د) هیدرید تیتانیم

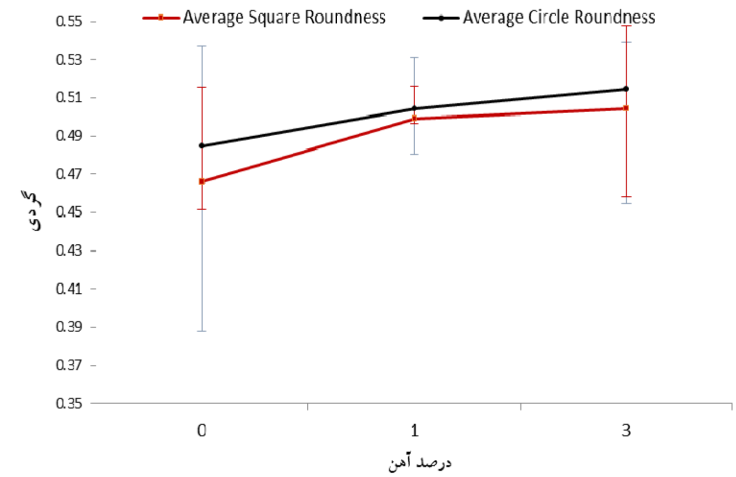


شکل ۲ جداره سلولی در آلیاژهای تولیدی با درصد وزنی متفاوت از آهن
الف) و ب) ۰، ج) و د) ۱ و ه) و و) ۳ ٪

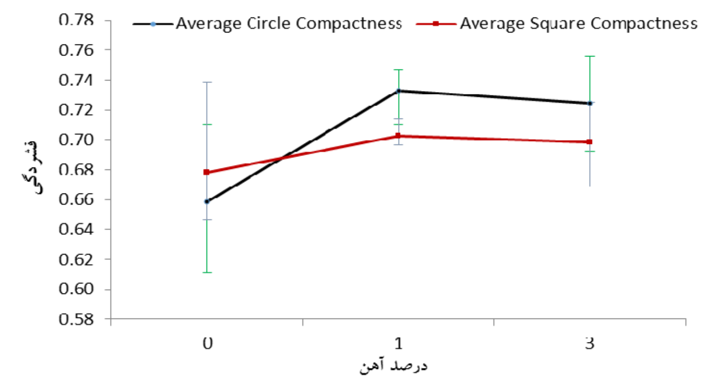
یک روش موثر برای بررسی تاثیر پایدارسازی آهن، تشکیل جداره‌های سلولی در حین مرحله فوم شدن است. از داده‌های بدست آمده از آنالیز تصویری در جدول (۳) و شکل (۳) می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش درصد وزنی آهن، کرویت و فشردگی سلول‌ها افزایش می‌یابد که منجر به ساختار همگن‌تری می‌شود. همچنین، از جدول (۳) مشاهده می‌شود که افزایش درصد وزنی آهن منجر به کاهش ضخامت جداره سلولی شده که ناشی از کاهش مقدار زه کشی است. به علاوه، تعداد سلول‌ها در واحد سطح (اینچ مربع) برای درصد وزنی آهن ۰، ۱ و ۳ ٪ در هر دو مقطع مربع و دایره در جدول (۳) و شکل (٤) نشان از بیشتر شدن (ریزتر شدن) حفره‌ها در واحد سطح دارد. به بیان دیگر، افزایش آهن منجر به تشکیل سلول‌های گردتر به همراه کاهش میزان زه‌کشی می‌شود. این پدیده به علت اثر جوانه‌زایی ذرات پودر آهن برای حباب است. به عبارت دیگر، با افزایش درصد وزنی آهن موجود در ساختار، مکان‌های تشکیل حباب بیشتر شده و تعداد بیشتری در واحد سطح جوانه می‌زنند. با افزایش زمان، این حباب‌ها رشد کرده و سبب کاهش ضخامت دیواره‌های سلولی و نیز چگالی ساختار می‌شوند، شکل (٤). از طرف دیگر، اگرچه افزایش مقدار آهن منجر به کاهش چگالی فوم می‌شود اما، کاهش مدول الاستیک را نیز به همراه دارد.

جدول ۳ داده‌های آنالیز تصویری برای هر یک از نمونه‌ها

کد نمونه	گردی (%)	فشردگی (%)	تعداد سلول‌ها (PPI)	متوسط اندازه دیواره سلولی (Micron)
0CS	۰/۵۲±۰/۰٤	۰/۷۱±۰/۰۲	۷۲±۵	۷۰±٤
0CM	۰/٤۹±۰/۰۲	۰/٦۵±۰/۰۳	۷۱±۵	
0CL	۰/٤۵±۰/۰۲	۰/٦۱±۰/۰۲	۱۰۹±۸	
0SS	۰/٤۷±۰/۰۳	۰/٦۵±۰/۰۲	٦۷±۷	۷۰±٤
0SM	۰/۵٤±۰/۰۳	۰/۷٤±۰/۰۳	۱۱۰±٤	
0SL	۰/۳۹±۰/۰۲	۰/٦۵±۰/۰۲	۱٦۷±۸	
1CS	۰/۵۰±۰/۰٤	۰/۷۱±۰/۰۲	۹۸±۸	٤۸±٦
1CM	۰/۵۰±۰/۰۳	۰/۷۵±۰/۰٤	۱۹۰±۹	
1CL	۰/۵۲±۰/۰۳	۰/۷٤±۰/۰۳	۱۹۳±٦	
1SS	۰/٤۸±۰/۰۲	۰/۷۰±۰/۰۳	۹۸±۸	٤۸±٦
1SM	۰/٤۹±۰/۰۳	۰/۷۰±۰/۰۲	۱۲۳±۵	
1SL	۰/۵۳±۰/۰۳	۰/۷۱±۰/۰۵	۲٤۳±۷	
3CS	۰/۵۵±۰/۰۳	۰/۷٦±۰/۰٤	۱٤۰±۹	٤۰±۵
3CM	۰/۵٤±۰/۰٤	۰/۷۲±۰/۰۳	۱٦٤±٦	
3CL	۰/٤٦±۰/۰٤	۰/٦۹±۰/۰٤	۲۷۱±۱۱	
3SS	۰/٤۵±۰/۰۳	۰/٦۷±۰/۰۳	۱۰٦±۵	٤۰±۵
3SM	۰/٤۸±۰/۰۳	۰/۷۰±۰/۰٤	۱۷٦±۷	
3SL	۰/۵٤±۰/۰٤	۰/۷۳±۰/۰۳	۳٤۳±۱۲	

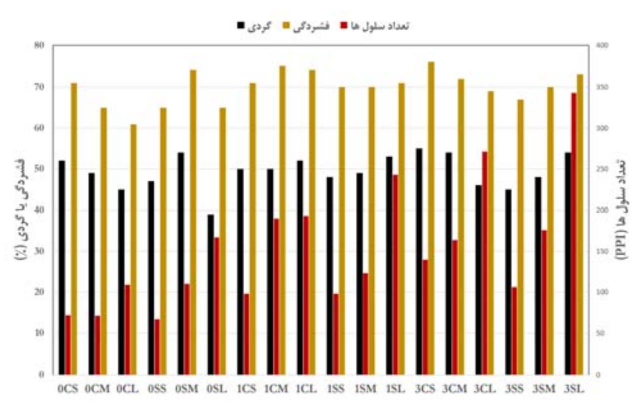


(الف)

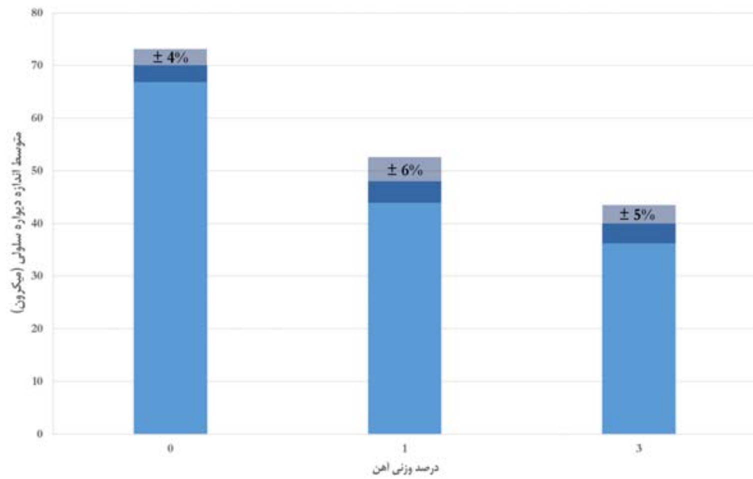


(ب)

شکل ۳ تغییرات الف) گردی و ب) فشردگی بر حسب درصد وزنی آهن موجود در آلیاژ

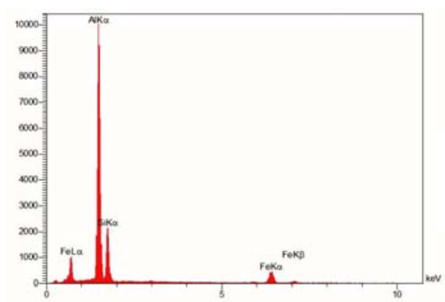


(الف)



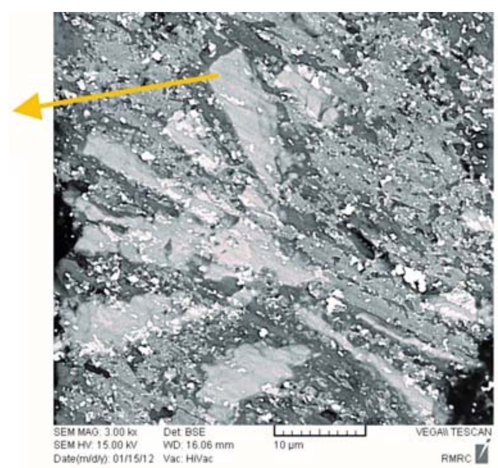
(ب)

شکل ٤ الف) فشردگی، گردی و تعداد سلول‌ها بر واحد سطح برای نمونه‌های آزمایش شده
ب) اثر درصد وزنی آهن بر متوسط اندازه دیواره سلولی فوم تولید شده



Quantitative Results

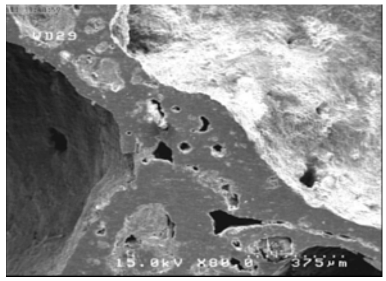
Elt	Line	W%	A%
Al	Ka	59.58	67.35
Si	Ka	19.61	21.29
Fe	Ka	20.81	11.36
		100.00	100.00



شکل ٥ تصویر میکروسکوپ الکترونی و آنالیز نقطه‌ای طیف سنجی اشعه ایکس از فاز τ6 در نمونه حاوی ٣ ٪ آهن

تصویر میکروسکوپ الکترونی و طیف سنجی اشعه ایکس (EDS) ناحیه مشخص شده از نمونه حاوی ٣ ٪ آهن در شکل (٥) نشان داده شده است. مقایسه ترکیبات بین فلزی در سیستم Al-Si-Fe و آلیاژ حاوی ٣ ٪ آهن و نیز تصاویر میکروسکوپ الکترونی، مشخص می‌کند که فاز لایه‌ای موجود در ساختار، فاز تیغه‌ای و ترد τ6 است [29,30]. این فاز بر اساس نتایج طیف سنجی اشعه ایکس شکل (٥) و مرجع اشاره شده دارای ترکیب Al_4Fe_2Si است. حضور این ترکیبات بین فلزی ترد و سوزنی در دیواره‌های سلولی منجر به تمرکز تنش و در نتیجه شکست دیواره‌ها می‌شود. این فازها در نمونه حاوی ١٪ آهن نیز دیده می‌شوند. به علاوه، همانطور که در شکل (٦) نشان داده شده است، مقداری تخلخل در فضای سه گوش بین چند حباب وجود دارد. Mukherjee و همکارانش [31] این تخلخل‌ها را به دو دسته گازی و

انقباضی تقسیم کردند. تخلخل‌های گازی شکل کروی دارند و بدلیل انحلال هیدروژن در آلومینیم در حین انجماد تشکیل می‌شوند. با افزایش نرخ انجماد، این حفرات ریزتر می‌شوند. در مقابل، حفرات انقباضی بدلیل بی‌شکل بودن سبب تمرکز تنش می‌شوند. همچنین، برخی از آنها به عنوان منشاء ترک عمل کرده که یکنواختی تغییر شکل را کم می‌کنند.



شکل ٦ تخلخل موجود در جداره سلولی نمونه حاوی ۱ ٪ آهن

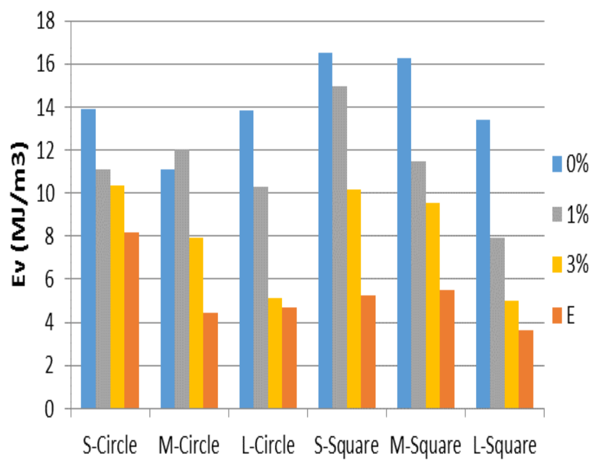
الف
ب
ج
د
ه
و



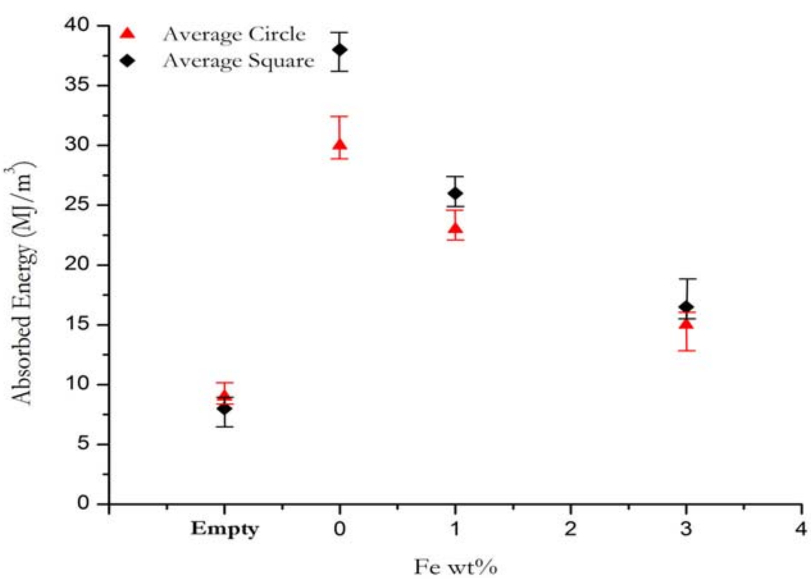
شکل ۷ مقاطع تغییر شکل داده به ترتیب از چپ تو خالی و توپر با ۰، ۱ و ۳ ٪ وزنی آهن دایره‌ای الف) کوچک، ب) متوسط و ج) بزرگ و مربعی د) کوچک،ه) متوسط و و) بزرگ.

تصویر مقاطع توخالی و توپر فشرده شده در شکل (۷) نشان داده شده است. بر خلاف یافته‌های Jones [6]، در ساختارهای جدار نازک با مقطع دایره‌ای اگرچه نسبت شعاع به ضخامت لوله‌ها کمتر از ٤٠ است، اما لولا شدن لوله غیر متقارن (الماسی) است. این در حالی است که در لوله‌های پرشده از فوم حاوی ۳ ٪ آهن با مقطع دایره، تغییر شکل کاملاً متقارن است. سطح زیر منحنی تنش- کرنش تا کرنش چگالش مقدار جذب انرژی را نشان می‌دهد. انرژی جذب شده بر واحد حجم مقاطع مختلف بر حسب درصد وزنی آهن در فوم، در شکل (۸) نشان داده شده است.

می‌توان مشاهده کرد که مقدار متوسط جذب انرژی بر واحد حجم لوله‌های توخالی در مقاطع مربعی کمتر از مقاطع دایره‌ای است شکل (۸ و ۹).



شکل ۸ مقایسه میزان جذب انرژی مقاطع مختلف تو خالی و تو پر با درصد وزنی مختلف آهن



شکل ۹ مقایسه میزان جذب انرژی لوله‌های توپر بادرصد وزنی آهن موجود در ساختار

در آزمون فشار تک محوره شبه استاتیک، قابلیت جذب انرژی لوله با افزایش تعداد اضلاع و گوشه‌های مقطع، افزایش می‌یابد. این امر ناشی از افزایش تعداد لولاهای پلاستیک است. نتایج مشابهی توسط محققین دیگر گزارش شده است [6,32]. از طرف دیگر، با پر شدن مقاطع با فوم، شرایط تغییر کرده و میزان جذب انرژی مقطع مربعی بیشتر از دایره‌ای می‌شود. بدلیل اندر کنش بین جداره لوله و فوم، مقاومت به له شدگی و جذب انرژی لوله‌های جدار نازک پر شده از فوم در مقایسه با لوله‌های توخالی تا حدود ۴۰٪ افزایش می‌یابد. به علاوه، این اندرکنش، طول لولا را کاهش و در نتیجه نیروی لازم برای له کردن لوله را افزایش می‌دهد. Hanssen و همکارانش نشان دادند وقتی نسبت ارتفاع به عرض قوطی با مقطع مربع شکل (۳) باشد، پر کردن آن با فوم می‌تواند تعداد لولاها را از ۵ برای قوطی تو خالی تا ۹ برای قوطی پر شده افزایش دهد [19]. همچنین، نتایج آنها نشان می‌دهد که علاوه بر ارتباط مستقیم تعداد لولاهای ایجاد شده با چگالی فوم، نیروی لازم برای له شدن لوله نیز با افزایش چگالی فوم افزایش می‌یابد [15,17].

در شکل(۸) دیده می‌شود که فوم عاری از آهن، جذب انرژی مقطع مربعی را به ۳۰ MJ/m^3 افزایش می‌دهد. این افزایش ۹ MJ/m^3 بیشتر از افزایش لوله با مقطع دایره‌ای است. به بیان دیگر، لوله با مقطع مربعی ۴۴٪ انرژی بیشتری نسبت به مقطع دایره‌ای در حالت خالی جذب می‌کند. به همین ترتیب، در فوم‌های حاوی ۱ و ۳ ٪ آهن، مقطع مربعی میزان جذب انرژی بیشتری نسبت به مقطع دایره‌ای به اندازه به ترتیب ٤ MJ/m^3 و۳ دارد. همچنین، نتیجه گرفته می‌شود که با افزایش درصد وزنی آهن فوم، به دلیل کاهش چگالی فوم، قابلیت جذب انرژی کاهش می‌یابد. در لوله‌های با مقطع مربعی، اضافه شدن ۳٪ آهن منجر به افزایش ۵۸٪ سلول‌ها شده در حالیکه در مقطع مربعی این افزایش ۸۸٪ است. این به این معنا است که حضور آهن، شکست دیواره سلولی را به تعویق انداخته و منجر به تشکیل فوم پایدارتر می‌شود. علاوه بر این، اضافه شدن آهن در پیش فوم، تعداد مکان‌های جوانه‌زنی حباب را افزایش داده و در نتیجه تعداد سلول‌ها افزایش می‌یابد که منجر به کاهش چگالی فوم می‌شود شکل (٤).

به منظور بررسی میزان جذب انرژی بر واحد حجم لوله پر شده با فوم فلزی و تاثیر پارامترهای مختلف همچون: هندسه سلولی فوم، هندسه لوله جداره نازک و دانسیته فوم پرکننده لوله‌ها، مدل تجربی–ریاضی ارائه شد. این مدل با توجه به عوامل ذکر شده در منابع مطالعاتی [1-3,6,8,15,17] توسعه داده شده است و بصورت معادله کلی (۸) که در بر دارنده عوامل موثر مذکور بر انرژی جذب شده است، ارایه شده و منجر به رابطه (۹) شد:

$$E_v = f\left(\left(\frac{\rho_f}{\rho_p}\right)^{\frac{3}{2}}, \%Fe, \frac{d}{D}, A_m\right) \qquad (۸)$$

که Ev میزان جذب انرژی بر واحد حجم، $\frac{\rho_f}{\rho_p}$ چگالی نسبی، $\frac{d}{D}$ و A_m به ترتیب نسبت قطر متوسط حباب‌ها به قطر لوله و میانگین مساحت تخلخل‌ها است. با استفاده از روش حداقل مجموع مربعات مدلی به بصورت معادله (۹) توسعه می‌یابد:

$$E_V = 215.9\left(\frac{\rho_f}{\rho_p}\right)^{\frac{3}{2}} - 2.68\%Fe + 105.7\left(\frac{d}{D}\right) - 1.35A_m - 20.7 \qquad (۹)$$

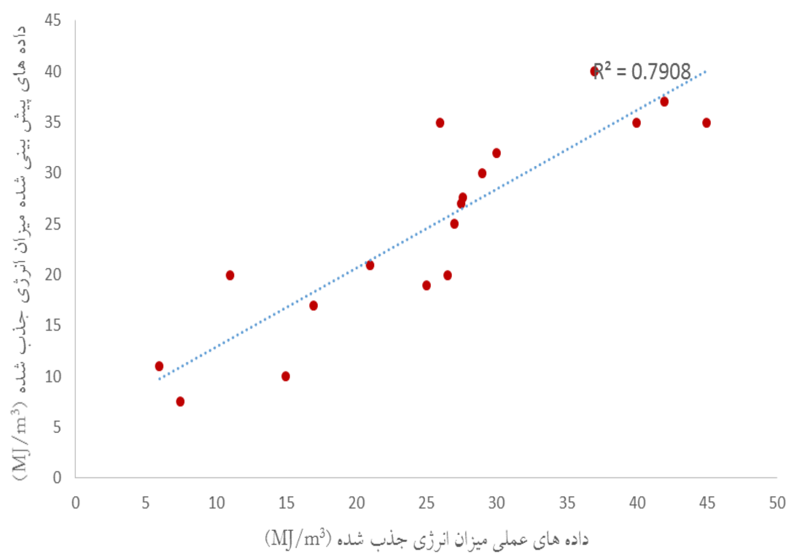
که تطابق خوبی (R^2=88%) با مدل ارائه شده توسط Raj معادله (۱۰) دارد [33]:

$$E_V = 78.79\left(\frac{\rho_f}{\rho_p}\right)^{\frac{3}{2}} - 7.18\left(\frac{d}{D}\right) - 1.89\left(\frac{k}{k_p}\right) + 1.2 \qquad (۱۰)$$

که در آن k و k_p بـه ترتیـب انیزوتروپـی سـلولی موجود و سلولی ایده‌ال است. مقادیر انرژی جذب شده بر واحد حجم برای نمونه‌های مختلف با توجه به مـدل ارائه شده در رابطـه (۹) محاسـبه شـد. نمـودار مقـادیر محاسبه شده انرژی بر واحد حجـم بـر حسـب مقـادیر بدست آمده از آزمایش فشار تک محوره در شکل (۱۰) نشان داده شده است. لذا، اگـر مقـادیر بدسـت آمـده از معادله (۹) در محور عمودی مشخص شود، و مقـداری که از سطح زیر منحنی تـنش کـرنش نمونـه‌هـا بدسـت می‌آید در روی محور افقی رسم شود باید محـل دقیـق این نقطه مختصات روی خط راست با زاویه ٤٥ درجـه قرار گیرد. لذا، اگر این رونـد بـرای تمـام چگـالی‌هـای مختلف فوم انجام گیرد؛ باید تمامی نقاط روی خـط ٤٥ درجه قرار گیرند تا مدل ارایه شده توسط معادله (۹) بـا داده‌های تجربی تطابق ۱۰۰٪ داشته باشد. لذا هـر گونـه انحراف از این خط میزان خطـای مـدل حاضـر را بیـان می‌کند. این خطا توسط برازش متوسط مربعات از خـط مبنا با پارامتر بدون بعد R^2 بیـان مـی شـود و در شـکل (۱۰) ارایه شده است. لذا، هرچه مقـدار عـددی R^2 بـه عدد یک نزدیک تر باشد دقت مدل بالاتر خواهـد بـود. همانگونه که دیده مـی‌شـود، تطـابق نسـبتاً خـوبی بـین داده‌های پیش‌بینی شده و تجربی $R^2 =$ ۰/۷۹ وجود دارد که نشان از صحت مدل حاضر دارد.

نتیجه گیری

در تحقیق حاضر فوم آلـومینیم- سیلیسـیم سـلول بسته با مقادیر مختلف آهن به عنوان پایدارساز فـوم بـه روش متالورژی پودر با موفقیت تولید شد. رفتار جـذب انرژی و خواص فشاری لوله‌هـای پـر شـده از فـوم بـا سطح مقطع مربع و دایره در سه اندازه کوچک، متوسـط و بزرگ نشان داد که اضافه شدن آهن منجر به سـاختار سلولی همگن با ضریب کرویت نزدیکتر بـه یـک مـی-شود. همچنین، چگالی فوم، میزان زه‌کشـی و ضـخامت جداره سلولی با افزایش عنصر آهن، کـاهش مـی‌یابنـد.



شکل ۱۰ محاسبه مقادیر پیش‌بینی شده با آزمایش شده در واحد حجم فوم

علاوه بر این، در تمامی نمونه‌ها مقدار جذب انرژی با افزایش مقدار آهن کاهش یافت که بدلیل حضور فازهای بین فلزی ترد τ_6 در دیواره سلولی است. در نتیجه، حداکثر استحکام مخصوص در فوم عاری از آهن بدست می‌آید. از طرف دیگر حضور حفرات انقباضی منجر به تمرکز تنش در دیواره سلولی می‌شود که سبب شکست در تنش‌های کمتر می‌شود. سطح زیر منحنی در ناحیه تنش صاف در منحنی تنش- کرنش که مقدار انرژی جذب شده بر واحد حجم را نشان می‌دهد، با افزایش قطر لوله کاهش یافت. در اثر پر کردن لوله‌ها با فوم فلزی بدون پودر آهن، در مقاطع مربع شکل بطور میانگین، تقریباً ۳۰ MJ/m^3 افزایش انرژی جذب شده مشاهده گردید که این مقدار، ۹ MJ/m^3 بیشتر از میانگین افزایش انرژی جذب شده در مقاطع دایره‌ای بود. در ۰٪ وزنی پودرآهن، مقاطع مربع شکل ٤٤٪ بیشتر از مقاطع دایره در جذب انرژی مؤثر بوده‌اند. به همین ترتیب در ۱٪ و ۳٪ آهن نیز مقاطع مربع تأثیر بیشتری داشته‌اند اما این تأثیر کاهش یافته و اختلاف افزایش در جذب انرژی به ترتیب به ۳ MJ/m^3 و ٤ MJ/m^3 رسیده است. در تمامی اندازه‌های لوله‌ها، لوله بدون ترکیبات آهن بیشترین میزان جذب انرژی و لوله حاوی ۳ درصد وزنی آهن کمترین میزان را داشته است.

در پژوهش حاضر پیش‌بینی مقدار جذب انرژی بر واحد حجم، به صورت یک مدل جدید با دقت مناسب ارائه شد که می‌تواند استفاده کاربردی داشته باشد.

مراجع

1. Abramowicz W., "Thin-walled structures as impact energy absorbers", *Thin-Walled Structures*, vol. 41, Issue 2–3, pp. 91-107 (2003).
2. Langseth M., Hopperstad O.S., Berstad T., "Crashworthiness of aluminium extrusions: validation of numerical simulation, effect of mass ratio and impact velocity", *International Journal of Impact Engineering*, vol. 22, Issue 9–10, pp. 829-854 (1999).
3. Reyes A., Langseth M., Hopperstad O.S., "Square aluminum tubes subjected to oblique loading", *International Journal of Impact Engineering,* vol. 28, Issue 10, pp. 1077-1106 (2003).
4. Tang Z., Liu S., Zhang Z., "Energy absorption properties of non-convex multi-corner thin-walled columns", *Thin-Walled Structures*, vol. 51, Issue 1, pp. 112-120 (2012).
5. Yamashita M., Kenmotsu H., Hattori T., "Dynamic axial compression of aluminum hollow tubes with hat cross-section and buckling initiator using inertia force during impact", *Thin-Walled Structures*, vol. 50, Issue 1, pp. 37-44 (2012).
6. Jones N., "Structural Impact", Cambridge University Press (1989).
7. Cheng Q. et al., "Energy absorption of aluminum foam filled braided stainless steel tubes under quasi-static tensile loading conditions", *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 48, Issue 11, pp. 1223-1233 (2006).
8. Ashby M.F. et al., "Metal Foams, A design guide", Butterworth Heinmann (2000).
9. Najafi A., Rais-Rohani M., "Mechanics of axial plastic collapse in multi-cell, multi-corner crush tubes", *Thin-Walled Structures*, vol. 49, Issue 1, pp. 1-12 (2011).

10. Reyes A., Hopperstad O.S., Langseth M., "Aluminum foam-filled extrusions subjected to oblique loading: experimental and numerical study", *International Journal of Solids and Structures*, vol. 41, Issue 5–6, pp. 1645-1675 (2004).
11. Zarei H.R., Kröger M., "Bending behavior of empty and foam-filled beams: Structural optimization", *International Journal of Impact Engineering*, vol. 35, Issue 6, pp. 521-529 (2008).
12. Zarei H.R., Kröger M., "Optimization of the foam-filled aluminum tubes for crush box application", *Thin-Walled Structures*, vol. 46, Issue 2, pp. 214-221 (2008).
13. Kavi H., Toksoy A.K., Guden M., "Predicting energy absorption in a foam-filled thin-walled aluminum tube based on experimentally determined strengthening coefficient", *Materials & Design*, vol. 27, Issue 4, pp. 263-269 (2006).
14. Santosa S., Wierzbicki T., "Crash behavior of box columns filled with aluminum honeycomb or foam", *Computers & Structures*, vol. 68, Issue 4, pp. 343-367 (1998).
15. Santosa S.P. et al., "Experimental and numerical studies of foam flled sections", *International Journal of Impact Engineering*, vol. 24, pp. 504-534 (2000).
16. Santosa S.P. et al., "Experimental and numerical studies of foam-filled sections", *International Journal of Impact Engineering*, vol. 24, Issue 5, pp. 509-534 (2000).
17. Seitzberger M. et al., "Experimental studies on the quasi-static axial crushing of steel columns filled with aluminium foam", *International Journal of Solids and Structures*, vol. 37, Issue 30, pp. 4125-4147 (2000).
18. Zhang C.-j., Feng Y., Zhang X.-b., "Mechanical properties and energy absorption properties of aluminum foam-filled square tubes", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 20, Issue 8, pp. 1380-1386 (2010).
19. Hanssen A.G., Langseth M., Hopperstad O.S., "Static and dynamic crushing of square aluminium extrusions with aluminium foam filler", *International Journal of Impact Engineering*, vol. 24, pp. 347-383 (2000).
20. Britan A. et al., "The effect of fine particles on the drainage and coarsening of foam", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 344, Issue 1–3, pp. 15-23 (2009).
21. Deqing W., Ziyuan S., "Effect of ceramic particles on cell size and wall thickness of aluminum foam", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 361, Issue 1–2, pp. 45-49 (2003).
22. Kennedy A.R., Asavavisitchai S., "Effects of TiB_2 particle addition on the expansion, structure and mechanical properties of PM Al foams", *Scripta Materialia*, vol. 50, Issue 1, pp. 115-119 (2004).
23. Esmaeelzadeh S., Simchi A., Lehmhus D., "Effect of ceramic particle addition on the foaming behavior, cell structure and mechanical properties of P/M $AlSi_7$ foam", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 424, Issue 1-2, pp. 290-299, (2006).
24. Gergely V., Clyne T.W., "Drainage in standing liquid metal foams: modelling and experimental

observations", *Acta Materialia*, vol. 52, Issue 10, pp. 3047-3058 (2004).

25. Mondolfo L.F., "Aluminum alloys: structure and properties", London: Butterworths (1976).
26. Yi J.Z. et al., "Effect of Fe-content on fatigue crack initiation and propagation in a cast aluminum–silicon alloy (A356–T6)", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 386, pp. 396–407 (2004).
27. Baumgärtner F., Duarte I., Banhart J., "Industrialization of Powder Compact Foaming Process", *Advanced Engineering Materials*, vol. 2, Issue 4, pp. 168-174 (2000).

۲۸. خواجه‌علی م.ج.، "ساخت قوطی های فومی تو پر و بررسی پارامترهـای مـوثر بـر جـذب انـرژی آنهـا"، دانشـکده مهندسـی معـدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (۱۳۹۰).

29. Gupta S.P., "Intermetallic compound formation in Fe–Al–Si ternary system: Part I", *Materials Characterization*, vol. 49, Issue 4, pp. 269-291 (2002).
30. Maitra T., Gupta S.P., "Intermetallic compound formation in Fe–Al–Si ternary system: Part II", *Materials Characterization*, vol. 49, Issue 4, pp. 293-311 (2002).
31. Mukherjee M., et al., "The effect of cooling rate on the structure and properties of closed-cell aluminium foams", *Acta Materialia*, vol. 58, Issue 15, pp. 5031-5042 (2010).
32. Alavi Nia A., Haddad Hamedani J., "Comparative analysis of energy absorption and deformations of thin walled tubes with various section geometries", *Thin-Walled Structures*, vol. 48, Issue 12, pp. 946-954 (2010).
33. Raj R.E., Daniel B.S.S., "Structural and compressive property correlation of closed-cell aluminum foam", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 467, Issue 1–2, pp. 550-556 (2009).